

О РАСПРОСТРАНЕНИИ ВЯЗКОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ РАДИАЛЬНОЙ СХЕМЕ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА И ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Богатов А.А.
Уральский федеральный университет

Различают стадию докритического подрастания макротрещины, которая при достижении критического размера переходит в стадию лавинообразного распространения. В работе показано, что продолжительность стадии докритического подрастания дефекта определяется скоростями конечного формоизменения металла в вершине трещины и накопления поврежденности на фронте ее распространения. Показано, что распространение трещины в начальной стадии имеет скачкообразный характер.

ВВЕДЕНИЕ

В механике трещин [1] используются два подхода. Первый из них энергетический, предложенный Гриффитсом, основан на анализе характера изменения величины свободной энергии U_n упругодеформируемого тела на фронте трещины длиной $2c$, которая определяется соотношением ее поверхностной энергии и потенциальной энергии упруго-деформируемого тела. Согласно второму закону термодинамики трещина будет самопроизвольно расти, если свободная энергия тела с растущей трещиной будет уменьшаться, то есть будет выполняться условие: $\frac{\partial U_c}{\partial c} > 0$. Если $\frac{\partial U_c}{\partial c} < 0$, то трещина устойчива и без дополнительного внешнего воздействия расти не будет. Из условия $\frac{\partial U_c}{\partial c} = 0$ определяется величина критического напряжения $\sigma_{кр}$, под действием которого трещина будет самопроизвольно расти.

Для металлов характерно наличие пластической зоны в вершине трещины. Поэтому Ирвин ввел понятие вязкости разрушения металла G . Величина G характеризует работу пластической деформации, необходимую для роста трещины на единицу длины. Критическое значение величины G_n соответствует достижению длины трещины критического размера $\tilde{n}_{\partial\partial}$, после чего наступает самопроизвольное ее распространение. При плоской деформации вязкость разрушения обозначают G_{1c} .

Второй подход основан на исследовании распределения напряжений вблизи вершины трещины, которая является концентратором напряжений. Для острой трещины, находящейся в упругом теле, в вершине, как показывает теоретическое решение, напряжение стремится к бесконечности. Допуская возможность образования на фронте трещины пластической зоны можно, применяя модель упругопластического тела, уточнить распределение напряжений в зоне дефекта. Распределение напряжений в зоне трещины при плоской деформации оценивается величиной интенсивности

напряжений K_I , достижение которой критического значения K_{IC} соответствует образованию макротрещины критического размера $\tilde{n}_{\partial\partial}$ и началу лавинообразного ее распространения. Величина K_{IC} тоже характеризует вязкость разрушения металла и функционально связана с величиной G_{1c} .

В некоторых случаях используется еще один критерий вязкости разрушения при плоской деформации – величина критического раскрытия трещины δ_{1c} , также как предыдущие критерии G_{1c} и K_{IC} характеризующая начало лавинообразного разрушения. Критерии G_{1c} , K_{IC} и δ_{1c} определяются при стандартных испытаниях плоских образцов с надрезом на трехточечный изгиб или внецентренное растяжение. По результатам испытаний, оценивая вероятность разрушения, нетрудно ранжировать материалы, что помогает решить проблему выбора марки стали или сплава для конкретного случая рассматриваемой конструкции.

Однако попытки, используя найденные в опытах характеристики вязкости разрушения G_{1c} или K_{IC} , предсказать критическое значение длины трещины с высокой точностью не удается. Известно, что фактически трещины на газопроводе или на летательном аппарате порой на порядок превосходят значение длины трещины критического размера, найденного при стандартном испытании. В работе сделана попытка объяснить это явление.

1. НАПРЯЖЕННОЕ И ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛА НА ФРОНТЕ РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ ТРЕЩИНЫ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОГО РАДИАЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА

Пусть трещина в начальный момент времени имеет длину $2c_0$ с радиусом в вершине r_0 . Если $c_0 = 0$, то имеет место пора радиусом r_0 . Будем рассматривать поведение дефекта в условиях плоского деформированного состояния. Используем модель идеально-пластической среды $T = \tau_s$. В полярной системе координат (ρ, φ) на свободной поверхности в вершине трещины

$\sigma_{\rho\rho}|_{\rho=r} = 0$, а $\sigma_{\varphi\varphi} = \pm 2\tau_s$; $\sigma_{zz} = \pm \tau_s$. Знак напряжения определяется из физических соображений: напряжение положительное, если текущее значение радиуса дефекта r увеличивается, и отрицательное, если r уменьшается. Компоненты тензора напряжений должны удовлетворять уравнению равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{\rho\rho}}{\partial \rho} + \frac{\sigma_{\rho\rho} - \sigma_{\varphi\varphi}}{\rho} = 0. \quad (1)$$

Условие идеальной пластичности Мизеса

$$\sigma_{\rho\rho} - \sigma_{\varphi\varphi} = 2\tau_s. \quad (2)$$

Решая совместно уравнения (1) и (2), определяем показатели напряженного состояния:

$$\frac{\sigma}{T} = \left(\pm 1 + 2 \ln \frac{\rho}{r} \right). \quad (3)$$

Будем полагать, что $\mu_\sigma = 0$ в вершине дефекта имеет место радиальное течение металла. Радиальная компонента вектора скорости определяется из решения уравнения несжимаемости $\frac{\partial v_\rho}{\partial \rho} + \frac{v_\rho}{\rho} = 0$ совместно с

граничным условием $v_\rho|_{\rho=r} = \pm v_0 = \text{const}$. Текущее значение радиуса дефекта определяется $r = r_0 \pm v_0 \tau$. В момент $\tau = t$ получим $v_\rho = \pm v_0 \frac{r}{\rho}$. Тогда интенсивность скорости деформации сдвига равна

$$H = 2v_0 \frac{r}{\rho^2} \quad (5)$$

Максимальное значение $H_{\max} = 2v_0 / r$ имеет место в вершине трещины. На рис.1 показаны поле линий скольжения и зависимость параметров $\frac{\sigma}{T}, H/H_{\max}$ от радиуса ρ . На графике $\frac{\sigma}{T}(\rho)$ кривая 1 соответствует случаю, когда радиус дефекта r увеличивается, а кривая 2, когда r уменьшается.

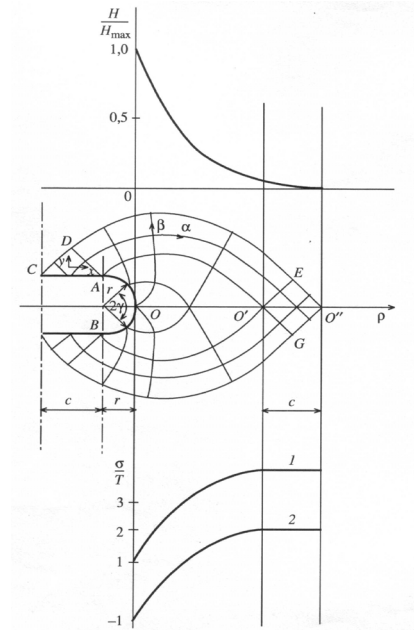


Рис.1. Поле линий скольжения, показатель напряженного состояния $\frac{\sigma}{T}$ и относительное значение интенсивности скорости деформации сдвига на фронте распространения трещины.

Степень деформации сдвига на фронте развивающейся трещины в зависимости от координаты ρ определяется, после

интегрирования $\Lambda = \int_0^t H d\tau$, по формуле:

$$\Lambda = \left| 2 \frac{r_1^2}{\rho^2} \ln \frac{r_1}{r_0} \right|, \quad (6)$$

где r_0 и r_1 – значения радиуса дефекта в начале и в конце деформации.

2. НАКОПЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА НА ФРОНТЕ РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ ТРЕЩИНЫ [2]

Будем полагать, что на фронте макроскопической трещины поврежденность в металле, характеризующая плотность распределения микропор и микротрещин в единице объема, до разрушения при $\tau = 0$ отсутствует ($\omega = 0$), а в момент образования новой микротрещины при $\tau = t_0$ равна единице ($\omega = 1$). Интенсивность накопления поврежденности в некоторый момент времени $0 < \tau < t_p$ равна

$$\frac{d\omega}{d\Lambda} = \frac{a\Lambda^{a-1}}{\Lambda_p^a} \quad (7)$$

Зависимость $\Lambda_p(\sigma/T)$ при неизменных значениях (параметрах) μ_σ, θ, H представлена на рис.2.

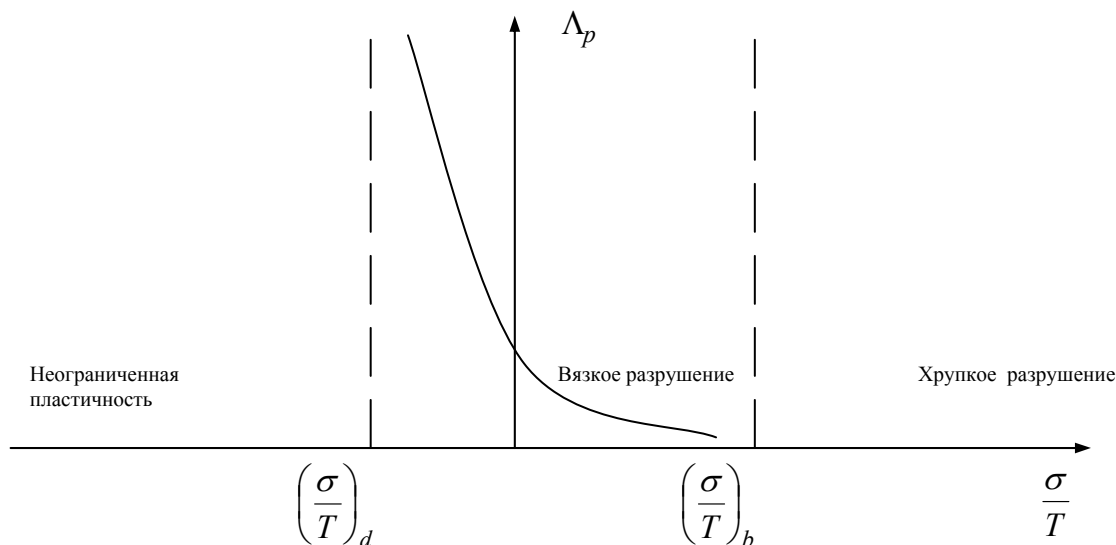


Рис.2. Диаграмма пластичности

На рис.2 показаны области хрупкого разрушения металла, если $\sigma/T > (\sigma/T)_b$, вязкого разрушения, если $(\sigma/T)_d < \sigma/T < (\sigma/T)_b$, а также область неограниченной пластичности, если $\sigma/T < (\sigma/T)_d$, для которой процессы залечивания микродефектов превалируют над процессами их образования и развития ($\Lambda_p \rightarrow \infty$).

Для изучения влияния показателя Лоде μ_σ на пластичность металла выбирают различные способы испытания образцов: осесимметричное растяжение ($\mu_\sigma = -1$), плоская деформация ($\mu_\sigma = 0$) или осесимметричное сжатие ($\mu_\sigma = 1$). Постоянство показателя σ/T при испытании образца обеспечивается выбором управления давления рабочей жидкости ∂ в испытательной камере по определенному закону. Результаты испытаний пластичности металла в области вязкого разрушения могут быть аппроксимированы зависимостью

$$\Lambda_p = \exp \left[b_1 + b_2 \mu_\sigma + (b_3 + b_4 \mu_\sigma) \frac{\sigma}{T} \right] \quad (8)$$

где b_1, b_2, b_3, b_4 - константы материала.

Зависимость $a(\sigma/T)$ определяется в результате испытания образцов на знакопеременное кручение с регулируемым давлением жидкости ∂ и аппроксимацией опытных данных по формуле

$$a = a_0^{1+\tilde{n}}, \quad (9)$$

где a_0 и \tilde{n} - константы материала.

На фронте распространения трещины происходит накопление поврежденности металла, которая определяется интегрированием (7). В момент $\tau = t_p$ поврежденность достигает значения $\omega = 1$ и образуется новая трещина, для которой также

требуется некоторый промежуток времени, чтобы поврежденность металла на фронте трещины вновь достигла значения $\omega = 1$. Таким образом, макротрещина будет развиваться прерывисто или скачкообразно.

3. О РАЗРУШЕНИИ ИЗДЕЛИЯ С МАКРОТРЕЩИНОЙ

Поверхностные трещины длиной $2c_0$ и радиусом в вершине r_0 при правке рельсов изгибом или в процессе эксплуатации могут развиваться. Начальный зазор между краями трещины в начальный момент равняется $2r_0$ и скорость его увеличения $2V_0$, зависит от стрелы упруго-пластического изгиба, размеров поперечного сечения рельса и скорости приложения нагрузки. На фронте развития трещины осуществляется пластическая деформация и происходит накопление поврежденности металла, которая стимулирует лавинообразное распространение макротрещины. Рассмотренный подход к анализу вязкого распространения трещины может быть применен при анализе долговечности рельсов при эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упруго-пластического разрушения. М.:Наука, 1974,416 с.
2. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002